

ضریب رفتار پلهای بتنی با سیستم جداسازی لرزه ای

سید مهدی زهرائی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختهای عمرانی، دانشکده عمران،

دانشگاه تهران، تهران، ایران

امیر خرمی نژاد، کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

E-mail: mzahrai@ut.ac.ir

دریافت: ۹۱/۰۳/۰۶ پذیرش: ۹۱/۰۸/۰۷

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در طراحی لرزه ای سازه ها، مسئله شکل پذیری و قابلیت استهلاک انرژی است که با ورود سازه به ناحیه غیرخطی ظاهر می شود. در طراحی به روشهای خطی (استاتیکی و دینامیکی) نیروهای لرزه ای به میزان R برابر کاهش داده می شوند که علت آن تشکیل مفاصل پلاستیک و به دنبال آن اتلاف انرژی سازه در اثر ورود به ناحیه غیرخطی است. از جمله مشکلات موجود در طراحی پلها، عدم صراحت آیین نامه در مورد نقش تکیه گاههای جداگرهای لرزه ای در تعیین R است، به گونه ای که در "آیین نامه طرح پلهای راه و راه آهن در برابر زلزله (نشریه ۴۶۳)" اشاره ای به اثر آنها در تعیین پارامتر R نشده است. از طرفی در الحاقیه آیین نامه اشته در مورد طراحی جداسازی لرزه ای پلهای بزرگراهی ذکر شده که ضریب اصلاح پاسخ برای همه قسمتهای زیرسازه، بایستی نصف مقادیر ارایه شده در حالت طراحی معمولی (بدون جداسازی) باشد، ولی مقدار R نباید کوچک تر از ۱/۵۰ در نظر گرفته شود. در این رابطه، کوچک گرفتن R به علت باقیماندن سازه در حالت رفتار ارتجاعی است. در مطالعه حاضر، برای بررسی پارامتر ضریب رفتار، از پنج مدل که اتصال روسازه به زیرسازه توسط نشیمنهای جداگرهای لرزه ای بوده، استفاده شده است. جداگرهای LRB براساس آیین نامه اشته طراحی شده اند و پارامتر ضریب رفتار آنها محاسبه شده است. بر مبنای نتایج این تحقیق، ضریب رفتار در پلهای جداسازی شده حدوداً نصف حالت عادی به دست آمده که ضمن توجیه توصیه آیین نامه اشته نشان می دهد زیرسازه این گونه پلها عموماً الاستیک باقی می ماند.

واژه‌های کلیدی: پلهای بتنی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، طراحی بر اساس عملکرد، جداگر لرزه ای، ضریب رفتار.

۱. مقدمه

تحقیق دیگری توسط [AlAayed and Chung, 2003] تحت عنوان "تحلیل لرزه ای پلها با استفاده از رویکرد برمبنای تغییرمکان" انجام گرفت که در آن تحلیل استاتیکی غیرخطی (NSP) با روش ضرایب تغییرمکان (DCM) برای پلها صورت گرفت و هدف آن مقایسه روش استاتیکی غیرخطی باروش تحلیل دینامیکی غیرخطی است. به این منظور پارامترهای تغییرمکان هدف، برش پایه و تغییرشکل مفاصل پلاستیک مورد بررسی قرار گرفتند. تحلیلها با استفاده از دو سطح شدت بار لرزه ای (سطح طراحی و سطح ماکزیمم لرزه موردتوجه) انجام شده اند. مقایسه‌های صورت گرفته دلالت بر محافظه کارانه بودن نتایج حاصل از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی داشتند. همچنین نتایج حاصل از روش (NSP) در سطح بیشینه لرزه مورد توجه (MCE) نسبت به سطح طراحی بسیار محافظه کارانه تر بودند. [Zahraiee and Mohammadi, 2005] در تحقیقی با عنوان "افزایش ایمنی پلها در برابر لرزه به کمک جداسازی لرزه‌ای" به بررسی خواص جداگر لرزه ای الاستومری، ارایه مبانی طراحی جداگرها طبق آیین‌نامه اشو و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف جداگرها مانند سختی اولیه، سختی ثانویه و نیروی تسلیم آنها در رفتار لرزه ای پنج پل بزرگراهی پرداختند. نتایج تحقیق نشان می‌داد هرچه سختی جانبی پل بیشتر باشد، تأثیر جداسازی لرزه‌ای مشهودتر است. از طرفی سختی اولیه جداگر نقش تعیین کننده در بازده سیستم ایفا می‌کند، به گونه ای که با کاهش سختی اولیه، معمولاً نیروها و جابجائیهای نسبی پل کاهش می‌یابند اما جابجائیهای مطلق عرشه بیشتر می‌شود که می‌توان با بکارگیری قطعاتی که نیروی تسلیم و میرائی جداگر را افزایش می‌دهد، مقدار جابجائی کل را کاهش داد.

[Memari et al., 2005] در تحقیق دیگری با عنوان "ارزیابی شکل پذیری تیپ ستونهای پلهای بتنی موجود در شرق آمریکا" به بررسی ضریب شکل پذیری تغییرمکانی و تخمین ضریب کاهش نیرو پرداختند. آنها پنج پل را تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرارداد و با محاسبه ضریب شکل پذیری تغییرمکانی آنها، با

عملکرد پلها به عنوان یک سیستم سازه ای ساده، به علت اهمیت در شریانه‌های حیاتی حمل و نقل به ویژه در شرایط اضطراری مانند وقوع زلزله، همواره مورد توجه بوده است. زلزله های اخیر در کشورهای مختلف و بخصوص زلزله های نرتریج و السترو آمریکا و کوبه ژاپن نشان دادند بسیاری از پلهای طراحی شده براساس ضوابط آیین نامه های موجود زلزله، دچار خرابیهای زیادی شدند و این درحالی بود که گزارشهای لرزه نگاری نشان می‌دادند شدت این زلزله ها کمتر از مقادیر نظیر در آیین نامه های طراحی بودند [Zahraiee, 2006].

این ضعف عملکردی پلها در بیشتر موارد مربوط به علت فلسفه طراحی ارتجاعی است که آیین نامه ها، نیروهای لرزه ای را کاهش می‌دهند و در کنار آن از جزییات اجرایی خاصی جهت افزایش شکل پذیری المانهای باربر جانبی استفاده می‌کنند تا به نوعی رفتار غیرارتجاعی واقعی پلها درحین زلزله را درطراحی آنها وارد کنند و همچنین سازه پل به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه گردد [AASHTO, Zahraiee, 2006 and 2001]

[Zheng and Usami, 2003] در تحقیقی، پاسخ لرزه ای پلهای فولادی چند دهانه را به وسیله تحلیل استاتیکی غیرخطی پیش‌بینی کردند. هدف از این تحقیق، بررسی کاربرد تحلیل استاتیکی غیرخطی برای پلهای چند دهانه پیوسته، که پایه های آنها با لایه های نازک فولادی تقویت شده اند، بود. مهم ترین نتیجه ای که از این تحقیق به دست آمد عبارت است از این که در پلها با توزیعات متناسب سختی پایه و یا عرشه سخت تر نسبت به پایه ها، مود اصلی در پاسخ سازه حاکم می‌شود و تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌تواند با اطمینان بیشتری بکار رود. به بیان دیگر اگر سیستم پل دارای توزیعی نامتناسب سختی پایه ها و همچنین درعین حال دارای عرشه ای انعطاف پذیر باشد، اثرات مودهای بالاتر اهمیت پیدا می‌کنند و نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی مطلوب نیست.

بررسی رفتار لرزه‌ای پلهای جداسازی شده با تکیه گاه انبساط حرارتی (نئوپرن) و امکان کاربری جزئی و محدود آنها پرداختند. نتایج تحلیل نشان می‌داد که کارایی تکیه گاههای موجود انبساط حرارتی در کاهش پاسخ های لرزه ای مناسب نبوده و حتی در صورت امکان لغزش لازم و تحمل کرنشهای برشی بزرگ در آنها به هنگام زلزله، به علت الاستیک خطی بودن رفتار نیرو- تغییرمکان، میرائی و استهلاک انرژی چندانی نداشته و نمی‌توانند از سطح انرژی زلزله و نیروهای برشی وارد بر زیرسازه پلها به میزان قابل ملاحظه ای بکاهند، در صورتی که سهم جداگرها در جذب و اتلاف انرژی ورودی زلزله بیش از ۵۰٪ است. براساس نتایج تحقیق نسبت کارایی نئوپرنها به جداگرهای لرزه ای برای کاهش نیروی برشی زلزله، بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ است. همچنین نئوپرنها در کاهش جابجائی سرستونها و افزایش ضریب حفاظت پایه موثر نبودند، اما جداگرهای لرزه‌ای ضمن کاهش پاسخهای لرزه ای، نیروی زلزله را بین پایه ها و کوله ها به صورت متعادل توزیع می‌کند.

تحقیق دیگری توسط [Jonsson, Bessason and Hafslund, 2010] با عنوان "پاسخ لرزه ای پل جداسازی شده تحت حرکات زمین نزدیک گسل" در ایسلند انجام شد. پل "Ose rarf" به طول ۳۷۰ متر شامل ۸ دهانه پیوسته است. عرشه شامل دو تیر بتن مسلح پیش تنیده است. اتصال روسازه به زیرسازه در کوله ها و پایه های اول و آخر توسط جداگر FPS و در سایر پایه ها با استفاده از جداگر LRB انجام شده است. این پل در ۲۸ ماه می سال ۲۰۰۸ تحت حرکات گسل فعال زلزله ای به شدت $M_w=6.3$ قرار گرفت. عملکرد کلی پل، مطلوب ارزیابی شد، اما بلوکهای عرضی سرستونها و همچنین دیوارهای گوشواره کوله ها به شدت آسیب دیدند. همچنین تغییر شکل قابل ملاحظه حدود ۳۰ سانتیمتر بین عرشه و کوله قابل مشاهده بود. محققان یک مدل سه بعدی از پل را با استفاده از نرم افزار SAP ساختند و تحت ارتعاشات ثبت شده از زلزله قرار دادند. مهم ترین خصوصیت ارتعاشات ثبت شده شتاب زیاد ($PGA=0.66g$)، فرکانسهای پایین و مدت زمان کم آن بود. با جایگزینی جداگرهای LRB به

استفاده از روش نیومارک-هال، ضریب رفتار سازه را در دو حالت اصل تغییرمکان یکسان و اصل انرژی یکسان محاسبه کردند. پل اول ۲۸ دهانه با عرشه مرکب شاهتیر فولادی با دال بتنی و دهانه هایی به طول متغیر بین ۵۳ تا ۱۵۰ فوت است. پایه‌های میانی به صورت دو، سه و چهارستونی با مقطع مستطیلی به ابعادی بین ۳ تا ۵ فوت هستند. سرستونها به دو صورت فلزی و بتنی است که نوع فولادی آن با اتصال مفصلی در قسمت فوقانی است.

پل دوم ۷ دهانه با عرشه مرکب شاهتیر فولادی با دال بتنی و دهانه‌هایی به طول متغیر بین ۱۷۹ تا ۲۷۸ فوت است. پایه ها به صورت دوستون پله ای بلند با مقطع مربعی به ابعادی بین ۶ تا ۱۲ فوت هستند.

پل سوم ۵ دهانه با تیرهای I شکل پیش تنیده با طول دهانه هایی بین ۴۸ تا ۸۳ فوت است. عرشه پل دارای زاویه کجی ۵۵ درجه و پایه ها به صورت سه ستونی با مقطعی مربعی به بعد ۳/۵۰ فوت هستند.

پل چهارم، شامل ۴ دهانه به طول متغیر بین ۵۳ تا ۱۵۰ فوت و زاویه بیه عرشه برابر ۳۵ درجه است. پایه ها به صورت سه ستونی با قطر ۲/۵۰ فوت و ارتفاع ۱۶ تا ۲۰ فوت هستند.

پل پنجم ۹ دهانه با تیرهای I شکل پیش تنیده با طول دهانه هایی بین ۹۴ تا ۱۳۰ فوت است. شش پایه به صورت تک ستونی و دو پایه دیگر به صورت دیواری است. ارتفاع پایه های تک ستونی بین ۲۰ تا ۴۲ متر با مقطع دایره ای به قطر ۸ فوت است.

متوسط مقادیر ضریب رفتار پایه های قابی شکل چندستونی پلها، در حالت استفاده از روش "اصل تغییرمکان یکسان، برابر ۵/۲۰ و در حالت استفاده از اصل انرژی یکسان" برابر ۳ محاسبه شده است. همچنین در پل پنجم که دارای پایه های تک ستونی است، ضریب رفتار برابر ۲/۲۸ و ۱/۸۸ به ترتیب برای حالت استفاده از روش "اصل تغییرمکان یکسان" و "اصل انرژی یکسان" محاسبه شده است.

[Zahraiee and Sami, 2008] در تحقیقی با عنوان "ارزیابی عملکرد لرزه ای پلها با تکیه‌گاههای موجود انبساط حرارتی" به

شده از زمین طبیعی و کنار پایه ها مربوط به فرکانسهای قائم است که به علت وجود شمعها است.

عرشه پل راه آهن متروی سانتیگو نیز بر روی نئوپرنهایی به ابعاد ۶۰×۳۰×۵/۲۰×۲۰/۵ سانتیمتر قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهند که شتابهای ثبت شده در بالای عرشه حدوداً دو برابر شتابهای ثبت شده در پایین پایه پلها است که بیانگر عملکرد مطلوب نشیمنهاست.

با آنکه طیف طرح استخراج شده مقادیر بزرگ تری نسبت به طیف طرح طراحی داشتند به واسطه عملکرد مطلوب جداگرها پلها هیچگونه خسارتی ندیدند. عمده خسارت پلهای منطقه مربوط به طول نشیمن ناکافی در کوله ها و پایه ها بود که منجر به بازنگری آیین نامه طراحی، با اقتباس از آیین نامه ژاپن شد.

در حدود چهار دهه از کاربرد جداسازی لرزه‌ای در پلها می گذرد و کارایی این نوع پلها همچنان تأیید شده است. مفهوم اصلی جداسازی لرزه‌ای یکی افزایش دوره تناوب سازه و دیگری افزایش میرایی سازه، یا هردو با هم است. در دهه ۱۹۷۰ ایجاد جداگرهای لرزه‌ای در پلها به عنوان ابزار مقاوم در برابر زلزله آغاز شد. در ادامه نمونه هایی از رفتار لرزه‌ای پلهای جداسازی شده ارائه شده است [Lee, Kitane and Buckle, 2001]:

پل Sierra Point در آمریکا: این پل منحنی شکل است و طول آن ۱۸۴/۸ متر و عرض آن ۳۵/۱ متر است. این پل در سال ۱۹۵۶ ساخته شده و در سال ۱۹۸۵ با بالشتکهای لاستیکی - سربی بین ستونها و روسازه مقاوم شده است. این پل زلزله ۱۹۸۹ "لوما پرایتا" را بدون وارد شدن خسارت به ستونها تحمل کرد.

پل El River در آمریکا: این پل در سال ۱۹۸۷ با بالشتکهای لاستیکی - سربی مقاوم شد. دو دهانه خرپایی پل عایق بندی شدند که هر دهانه ۹۰ متر طول دارد. این پل در معرض زلزله ۱۹۹۲ با بزرگی ۷ ریشتر و شتاب بیشینه زمین حدود ۰/۵۵g قرار گرفت. خسارتهای وارده به پل بسیار جزئی بوده و به فروریختن بتن در درزها محدود شد.

پل Miyagawa در ژاپن: این پل در سال ۱۹۹۱ ساخته شد و دارای سه دهانه باعرشه پیوسته از جنس تیرورق فولادی با طول

جای FPS تغییر مکان عرشه به حدود ۱۰ سانتیمتر کاهش داده شد و از طرفی عرشه عملکرد صلب تری از خود نشان داد و لنگرهای خمشی پایه ها نیز کاهش یافتند.

با مقایسه طیف پاسخ شتاب نگاشتهای ثبت شده با طیف طرح ارایه شده در Euro code ۸ می توان مشاهده کرد که بارهای لرزه ای آیین نامه، مقادیر کمتری نسبت به شتابهای ثبت شده داشته و تغییر شکل عرشه را حدود ۴ سانتیمتر برآورد می کنند که کمتر از مقدار حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی است. در پایان توصیه می شود با افزایش ارتفاع و ابعاد جداگرها تغییر شکلهای طولی و عرضی عرشه را کاهش داده تا خسارت کمتری متوجه دیوارهای گوشواره و بلوکهای عرضی شود.

تحقیق دیگری توسط [Sarrazin et al., 2012] با عنوان: "عملکرد پلها با تکیه گاههای جداسازی لرزه ای تحت زلزله "Maule" شبلی انجام شد. در ۲۷ فوریه ۲۰۱۰ زلزله ای به شدت $M_w=8/8$ در منطقه "مائوله" رخ داد. در این منطقه ۱۲ پل جداسازی شده وجود داشت که دوتای آنها به دستگاههای لرزه نگار مجهز بودند. اولی پل "مارگا مارگا" و دومی پل "راه آهن خط ۵ مترو سانتیگو" که به ترتیب به فاصله ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلومتری از مرکز زلزله قرار داشتند. عرشه پل اول متشکل از ۴ عدد شایه تیر فولادی پیوسته با دال ۲۷ سانتیمتری و عرشه پل دوم شامل ۲ تیر بتن مسلح پیش تنیده است.

پل مائوله شامل ۷ دهانه ۵۰ متری و یک دهانه ۳۳ متری است. شایه تیرها بر روی ۳۶ عدد جداگر LRB قرار گرفته اند. کوله ها و پایه های P1 و P7 مستقیماً بر روی بستر سنگی قرار گرفته اند و در زیر سایر پایه ها، ۱۰ شمع - ستون به طولهای ۱۴ تا ۳۱ متر قرار دارد. شتابهای ثبت شده نشان می دهند که شتابهای روی پایه نسبت به مقادیر مشابه در روی عرشه کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته اند که بیانگر عملکرد مطلوب سیستم جداسازی است. همچنین متوسط شتاب افقی ثبت شده در زمینهای اطراف پل بیشتر از شتاب ثبت شده در زیر پایه های پل است که می توان علت آن را وجود شمع ستونهای پل دانست که باعث کاهش نوسانات شده اند. در واقع عمده اختلاف بین فرکانسهای ثبت

بزرگراهی [AASHTO, 2001] عنوان شده است که ضریب اصلاح پاسخ برای همه قسمتهای زیرسازه، بایستی نصف مقادیر رایج شده در حالت طراحی معمولی (بدون جداسازی) باشد، ولی مقدار R نباید کوچک تر از $1/50$ در نظر گرفته شود. برای مثال چنانچه پایه میانی پل به صورت تک ستونی باشد، طبق آیین نامه ضریب رفتار آن برابر $R=3$ و چنانچه روی پایه تک ستونی جداساز لرزه ای بکار رفته باشد مقدار ضریب رفتار برابر $R=1.5$ خواهد بود که قدری عجیب به نظر می رسد. در این رابطه، کوچک گرفتن R به علت باقی ماندن سازه در حالت رفتار ارتجاعی است. تحقیقات انجام شده عموماً در مورد عملکرد لرزه ای پلهای جداسازی شده بوده است و به طور خاص در مورد ضریب رفتار این گونه پلهای، کار عمده ای انجام نشده است. در این تحقیق سعی بر آن است تا پارامتر ضریب رفتار به طور کمی مورد ارزیابی قرار بگیرد.

۲. ضریب رفتار

هدف اصلی در طراحی لرزه ای سازه ها براین منباست که رفتار سازه، در مقابل نیروهای ناشی از زلزله های کوچک بدون خسارت و در محدوده خطی مانده و در مقابل نیروهای ناشی از زلزله های شدید، ضمن حفظ پایداری کلی خود خسارتهای سازه ای و غیرسازه ای را تحمل کند. به همین دلیل مقاومت لرزه ای که مورد نظر آیین نامه های طراحی در برابر زلزله است، عموماً کمتر و در برخی موارد، بسیار کمتر از مقاومت جانبی مورد نیاز برای حفظ پایداری سازه در محدوده ارتجاعی، در یک زلزله شدید است. بنابراین، رفتار سازه ها به هنگام رخداد زلزله های متوسط و بزرگ وارد محدوده غیرارتجاعی می شود و برای طراحی آنها نیاز به یک تحلیل غیرارتجاعی است. اما به دلیل پرهزینه بودن این روش و گسترده نبودن برنامه های تحلیل غیرارتجاعی و سهولت روش ارتجاعی، روشهای تحلیل و طراحی متداول، براساس تحلیل ارتجاعی سازه و با نیروی کاهش یافته زلزله صورت می گیرد.

لازم به یادآوری است که با وجود اینکه ضرایب رفتار تعیین شده

$10.8/5$ متر و عرض 10.5 متر بوده که با بالشتکهای لاستیکی-سربی جداسازی شده است. این پل در سال ۱۹۹۱ تحت زلزله ای به بزرگی $4/9$ ریشتر قرار گرفت. براساس گزارشها، بیشینه شتاب عرشه، نصف بیشینه شتاب زمین بود و فرکانسهایی در محدوده ۳ تا ۵ هرتز توسط عایق ها با موفقیت فیلتر شدند، ولی فرکانس $1/2$ هرتز با ضریب دو افزایش یافت. در این زلزله به علت پایین بودن شتاب زمین، رفتار غیرخطی بالشتکها وارد عمل نشد که چنانچه زلزله های قوی تری رخ می داد بالشتکها بهتر عمل می کردند.

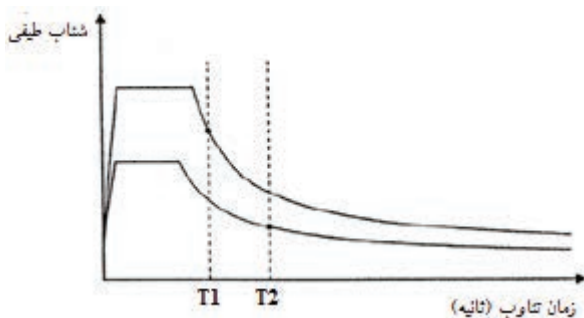
پل Bai-Ho در تایوان: این پل سه دهانه با عرشه پیوسته از جنس بتن پیش تنیده با طول 145 متر و عرض بیشینه $1/1616/1$ متر است که مجهز به بالشتکهای لاستیکی-سربی روی هر پایه و بالشتکهای لاستیکی با پوشش تفلون روی کوله ها است. اگرچه درحین زلزله ۱۹۹۹ با بزرگی ۶ ریشتر، ساخت پل هنوز تمام نشده بود، اما پل هیچ خسارتی ندید. افزایش قابل توجه زمان تناوب پل به علت رفتار غیرخطی بالشتکها باعث عملکرد مثبت پل در جهت طولی شده است.

سیستم جداسازی لرزه ای به عنوان نوعی سیستم کنترل غیرفعال، با محدود کردن نیروهای زلزله، باعث کاهش نیروهای لرزه ای وارد بر زیرسازه می شود و نوع رفتار غیرخطی این سیستم در تسلیم المانهای زیرسازه بسیار تعیین کننده است و به همین علت اثر مستقیمی در شکل پذیری (ضریب رفتار R) و استهلاک انرژی دارند. کنستانتینو و کوارشی در سال ۱۹۹۸ ضریب رفتار کوچک تری برای زیرسازه پلهای جداسازی شده اعلام کردند چون الف: رفتار ارتجاعی یا تقریباً ارتجاعی زیرسازه برای عملکرد مناسب جداسازی نیاز است و ب: پلهای جداسازی شده با توجه به تغییر ورودی زلزله، حساسیت بیشتری در پاسخ غیرارتجاعی زیرسازه اعمال می کنند [Constantinou and Quarshie, 1998].

از جمله مشکلات موجود در طراحی پلهای، عدم صراحت آیین نامه در نقش جداسازهای لرزه ای در تعیین R است، به گونه ای که در "آیین نامه طرح پلهای راه و راه آهن در برابر زلزله (نشریه ۴۶۳)" اشاره ای به اثر آنها در تعیین پارامتر R نشده است. از طرفی در الحاقیه آیین نامه اشتو در مورد طراحی جداسازی لرزه ای پلهای

عوامل موثر در تعیین R چنان است که به سختی می توان دو سازه با ضریب رفتار مشابه یافت. به عبارت دیگر، هر سازه ویژگیهای منحصر به فرد و مخصوص به خود را دارد. از این رو، به جای آنکه تمامی عوامل موثر یاد شده در رابطه ضریب رفتار وارد شوند، بهتر است تنها عواملی که نقش مهم تری دارند دخالت داده شوند. در این روش دو عامل اصلی ظرفیت سازه و نیروهای لرزه ای در نظر گرفته می شوند. سپس عواملی که ظرفیت را افزایش و نیروهای لرزه ای را کاهش می دهند، مشخص می شوند. در این روش، ظرفیت افزایش یافته R_C نامیده می شود. پاره ای از عوامل موثر در مقدار R_C عبارتند از: ضرایب بار، ضرایب کاهش مقاومت مصالح، طراحی دست بالای اعضا، سخت شدگی کرنشی، نامعینی سازه، شکل پذیری و اضافه مقاومت سازه.

به هنگام وقوع زلزله های شدید و متوسط، سازه در حالت ارتجاعی باقی نمی ماند و وارد محدوده خمیری می شود، به همین علت سختی آن کاهش و میرایی آن افزایش می یابد. کاهش سختی باعث طولانی شدن زمان تناوب و افزایش میرایی باعث افزایش استهلاك انرژی می شود. با بلندتر شدن زمان تناوب و افزایش میرایی، نیروهای لرزه ای وارد بر سازه کاهش می یابند. باتوجه به طیفهای پاسخ در شکل زیر سازه از مقدار متناظر با (T_1, S_{a1}) به مقدار (T_2, S_{a2}) می رسد. در این حالت نسبت نیروهای ارتجاعی به نیروهای غیرارتجاعی (کاهش یافته بر اثر نرم تر شدن سازه و افزایش استهلاك انرژی)، به عنوان RD تعریف می شود [Freeman, 1990].



شکل ۱: طیف نیروهای وارد بر سازه در دو حالت ارتجاعی و غیر ارتجاعی [Freeman, ۱۹۹۰].

در آیین نامه های طراحی لرزه ای در نظر دارند رفتار هیسترتیک، شکل پذیری، مقاومت افزون، میرایی و ظرفیت استهلاك انرژی را در محاسبه این ضریب وارد عمل کنند، مقادیر این ضریب در غالب آیین نامه ها عمدتاً براساس مشاهدات عملکرد سیستم سازه ای در زلزله های قوی گذشته، بر مبنای قضاوت مهندسی است [Tasnimi and Masoumi, 2006].

روشهای محاسبه ضریب رفتار را می توان به دو گروه کلی روشهای پژوهشگران آمریکایی و روشهای پژوهشگران اروپایی تقسیم بندی کرد [Tasnimi and Masoumi, 2006]. عموماً روشهای آمریکایی، مبانی تئوری ساده تری نسبت به روشهای اروپایی دارند و به همین علت کاربردی تر هستند. در روشهای آمریکایی، دو روش، شاخص تر از بقیه بوده و روشهای دیگر، با کمی تفاوت عمدتاً شبیه این روشها هستند. یکی از این روشها که به روش طیف ظرفیت معروف است حاصل تحقیقات "فریمن" است [Freeman, 1990]. روش دوم که به روش "ضریب شکل پذیری" مشهور است، دستاورد پژوهشهای "یانگ" است [Uang, 1992]. در سالهای اخیر پژوهشگران اروپایی نیز همگام با محققین آمریکایی به تحقیق در مورد برآورد ضرایب رفتار سازه ها پرداخته اند. عمدتاً روشهایی که توسط اروپاییها مورد استفاده قرار گرفته اند به دو گروه تقسیم می شود: روشهای متکی بر تئوری ضریب شکل پذیری و روشهای انرژی.

۱-۲ روش طیف ظرفیت فریمن

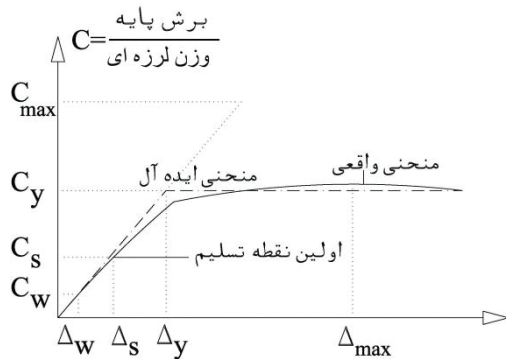
فریمن یک روش تحلیلی برای به دست آوردن مقدار R که تحت تاثیر پارامترهای زیادی قرار دارند، به صورت زیر ارایه کرد [Freeman, 1990]

$$R = R_i \times R_j \times R_k \times \dots \times R_n \quad (1)$$

که هر یک از پارامترها جانشین عواملی از قبیل، سیستم سازه ای، ترکیب بارها، درجه نامعینی، میرایی، ویژگیهای رفتار غیرخطی سازه، خصوصیات مصالح، نسبت ابعاد سازه، ساز و کار خرابی و پارامترهای موثر دیگری است. گستردگی

مقاومت بستگی دارد. در طراحی مقاطع برای این مقدار نیروی جانبی، می توان به روشهایی مانند روش حالت بار نهایی و روش ضرایب بار- مقاومت اشاره کرد. اختلاف مقدار نیروی وارده بین $C_y W$ و $C_s W$ را اصطلاحاً مقاومت افزون می نامند [Uang, 1992].

از آنجایی که در برخی از آیین نامه های طراحی، استفاده از روش تنش مجاز مرسوم است، آیین نامه ها مقدار C_s را به C_w کاهش می دهند.



شکل ۲. منحنی نیرو - تغییر مکان سازه [Uang, 1992]

۳-۲ روش نیومارک- هال

اولین تلاشها برای محاسبه پارامتر ضریب رفتار و ارتباط آن با ضریب شکل پذیری مربوط به "نیومارک وهال" در سال ۱۹۸۲ است که در آن، آنها روشی برای ساختن طیف غیرخطی از روی طیف خطی برای سازه یک درجه آزادی ارائه و در نهایت روابط (۱-۶) الی (۳-۶) را برای محاسبه ضریب رفتار ارائه کردند:

$$\begin{cases} R_{\mu} = 1.0 & T \leq 0.03 \text{ sec} & (1-6) \\ R_{\mu} = \sqrt{2\mu - 1} & 0.12 < T \leq 0.5 \text{ sec} & (2-6) \\ R_{\mu} = \mu & T > 1.0 \text{ sec} & (3-6) \end{cases}$$

رابطه (۲-۶)، به "اصل انرژی یکسان" و رابطه (۳-۶)، به "اصل تغییر مکان یکسان" مشهور است. "اصل انرژی یکسان" برای سازه های سخت و "اصل تغییر مکان یکسان" برای سازه های نرم مناسب است [Newmark and Hall, 1982].

۲-۲ روش ضریب شکل پذیری یانگ

یکی از معتبرترین روشها برای محاسبه ضریب رفتار، توسط پروفیسور یانگ (Uang) ارائه شده است [Uang, 1992]. در این روش ابتدا پیشینه برش پایه سازه هنگامی که سازه در محدوده خطی باقی می ماند، محاسبه می شود. ضریب کاهش بر اثر شکل پذیری (R_{μ}) نسبت برش پایه سازه در حالت الاستیک به برش پایه در تراز گسیختگی تعریف می شود. همچنین نسبت برش پایه در تراز گسیختگی سازه به برش پایه در هنگام تشکیل اولین مفصل پلاستیک نیز ضریب اضافه مقاومت نامیده می شود (Ω). با در نظر گرفتن رفتار کلی یک سازه متعارف (شکل ۲)، مقدار مقاومت ارتجاعی مورد نیاز که برحسب ضریب برش پایه C_{eu} تعریف شده عبارت است از [Uang, 1992]:

$$C_{eu} = \frac{V_e}{W} \quad (2)$$

در این رابطه، W وزن موثر سازه و V_e حداکثر برش پایه است، در صورتی که سازه کلا در محدوده ارتجاعی بماند.

$$\Omega = \frac{C_y}{C_s} \quad (3)$$

$$R_{\mu} = \frac{C_{eu}}{C_y} \quad (4)$$

$$R = \frac{C_{eu}}{C_s} = R_{\mu} \Omega \quad (5)$$

معمولاً طراحی صحیح یک سازه تا حدود قابل قبول منجر به شکل پذیر شدن آن می شود. در این حالت، سازه می تواند به پیشینه مقاومت خود ($C_y W$) برسد. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی در طبقه برابر با Δ_{max} است. از آنجایی که محاسبه مقدار ($C_y W$) با مقاومت حد خمیری سازه یا مقاومت نهایی به هنگام ایجاد ساز و کار گسیختگی متناظر بوده و نیاز به تحلیل غیرخطی دارد، مقدار آن با رابطه مشخصی بیان نشده است [Uang, 1992].

برای مقاصد طراحی، برخی آیین نامه ها، مقدار C_y را به مقدار C_s که نمایانگر تشکیل اولین لولای خمیری در مجموعه سازه است، کاهش می دهند. این مقدار نیرو، تراز است که در آن پاسخ کلی سازه به گونه قابل توجهی از قلمرو ارتجاعی خارج می شود. این تراز نیرو، به روش برخورد آیین نامه ها با طراحی بر مبنای

۳. مدل‌های بکاررفته در تحقیق

از آنجایی که در تمام پلهای اجراشده در ایران به جز پلهای پیوسته و یکپارچه، روسازه توسط نشیمنهای انبساط حرارتی (نئوپرن) از زیرسازه جدا شده است، در این تحقیق جداگرهای لرزه ای طرح شده بر اساس آیین نامه اشتو جایگزین نئوپرنهای انبساط حرارتی شده اند تا ضریب رفتار آنها با مقادیر ارایه شده در آیین نامه اشتو مقایسه شود. مشخصات پلها در جدول (۱) ارایه شده است. برای مدل سازی از نرم افزار SAP2000, V.14.2 استفاده شده است. این نرم افزار قابلیت مدل سازی انواع سازه ها با المانهای مختلف نظیر المانهای تیر، پوسته، ورق، فنرهای خطی و غیرخطی و همچنین انجام انواع تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی به صورت خطی و غیرخطی را دارد. برای مدلسازی المانهای شاهتیرهای عرشه از المان Frame و برای مدل سازی دال بتنی از المان Shell یا Frame با سختی معادل (جهت مدل سازی به روش [Grillage [Hambly, ۱۹۹۱]) استفاده شده است. برای مدل سازی جداسازهای لاستیکی چندلایه با هسته سربی (LRB) از المانهای غیرخطی NLink از نوع Rubber Isolator استفاده شده است. رفتار جداسازها به صورت مدل ایده ال هیسترتیک دوخطی در نظر گرفته شده است که دارای خصوصیات غیرخطی

در درجات آزادی برشی و خصوصیات خطی در سایر درجات آزادی است. مدل غیرخطی براساس رفتار هیسترتیک ارایه شده توسط Park (۱۹۷۶)، Wen (۱۹۸۶) و همکاران (۱۹۸۶) و مدل بکارگرفته شده در تحلیل سازه جداسازی شده توسط Nagar - jaiah و همکاران (۱۹۹۱) است.

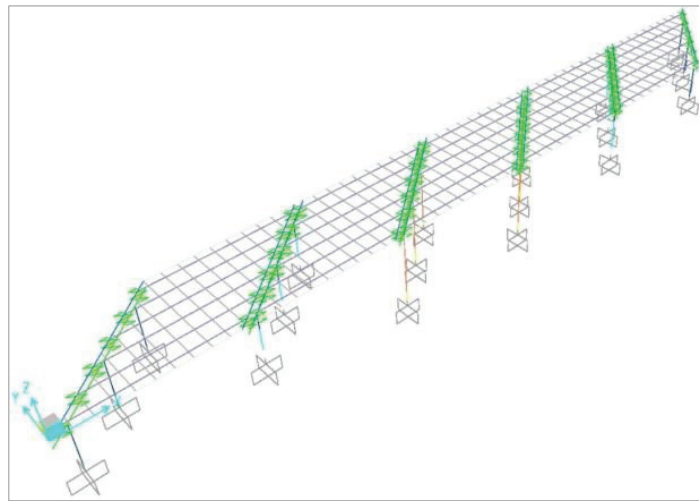
براساس این روش، پارامترهای مورد نیاز برای جداگر لاستیکی-سربی عبارتند از: سختی موثر در حالت خطی (K_{eff}) در درجات آزادی با خصوصیات خطی، سختی اولیه در حالت غیرخطی (K_{μ}) که در درجات آزادی با خصوصیات غیرخطی در نظر گرفته می شود و منظور سختی اولیه جداگر در مدل ایده آل دوخطی است، مقاومت جاری شدن (F_p) و نسبت سختی پس از جاری شدن (K_d/K_{μ}) ، که دو پارامتر اخیر نیز در درجات آزادی با خصوصیات غیرخطی اعمال می شوند.

۴. بارگذاری پلها

جهت بارگذاری پلها از آیین نامه بارگذاری پلهای راه و راه آهن و آیین نامه طرح پلهای راه و راه آهن در برابر زلزله استفاده شده است [Code of practice for loading, 2006 and Code of practice for design, 2008].

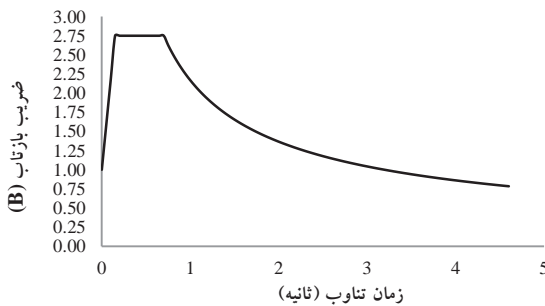
جدول ۱. مشخصات پلهای اول تا پنجم مورد بررسی

پل پنجم	پل چهارم	پل سوم	پل دوم	پل اول	
۶	۳	۵	۳	۳	تعداد دهانه ها
۲۲	۲۲	۲۰	$2 \times 15 + 50$	۳۰	طول دهانه ها (m)
۱۱/۸۰	۱۱/۸۰	۱۳/۶۰	۸/۸۰	۱۱/۸۰	عرض پل (m)
۶	۶	۶	۴	۴	تعداد شاهتیرها
بتنی	بتنی	بتنی	فلزی	فلزی	نوع شاهتیرها
۲	۲	۳	۲	۳	ستونهای هر پایه
۷/۱۶	۱۲/۳۵ و ۱۲/۶۵	۶/۲۰ و ۱۰/۷۰	۱۲/۴۰	۱۱/۷۰	ارتفاع پایه ها
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	قطر دایروی هرستون (cm)



شکل ۳. مدل اجزای محدود پل سوم

اساس نشریه ۴۶۳ انجام شده است. این طیف برحسب زمان تناوب و ضریب بازتاب است که برای استفاده جهت تحلیلهای غیرخطی (تبدیل به شتاب طیفی) لازم است در ضریب (AIg) ضرب شود. در شکل (۴)، طیف بازتاب طرح از نشریه ۴۶۳ ارایه شده است [Code of practice for design, 2008].



شکل ۴. طیف طرح ارتجاعی مورد استفاده (خاک تیپ ۳) [Publication No. ۴۶۳, Managemnt and Planning Org, 2008]

۵. طراحی جداساز لرزه ای

برای تحلیل و طراحی جداگرهای لرزه‌ای، دانستن پارامترهایی مانند نیروی وارده، جابجائی بیشینه و کمیت‌های سختی حالت

جدول ۳. بار زنده پلهای اول تا پنجم مورد بررسی

	پل اول	پل دوم	پل سوم	پل چهارم	پل پنجم
LL(ton)	۳۰۲	۲۷۲	۴۹۸	۲۳۸	۳۸۹

۴-۱ بارهای مرده

بارهای مرده مرحله اول شامل وزن شاهتیرهای فولادی یا بتنی و دال بتنی روی آن و دیافراگمها و اتصالات است. بارهای مرده مرحله دوم شامل بار آسفالت، پیاده رو، قرنیز و نرده ها است. بارهای فوق برای هر پل جداگانه محاسبه و توزیع شده است. در جدول (۲) مقادیر کل بارهای مرده هر پنج پل ارایه شده است.

۴-۲ بار زنده

بار زنده پل شامل بار کامیون ۴۰ تنی، تانک ۷۰ تنی، تریلی تانک بر ۹۰ تنی و بار نامحدود ۱/۵ تن برمتر است که طبق آیین نامه بارگذاری پلها به عرشه اعمال می شود تا بحرانی ترین حالت جهت طراحی عرشه و زیرسازه پدید آید. مقدار کل بار بحرانی پلهای اول تا پنجم در جدول (۳) ارایه شده است.

۴-۳ بار زلزله

برای محاسبه نیروی زلزله وارد بر سازه پل از روش تحلیل دینامیکی طیفی استفاده شده است. محاسبات نیروی زلزله بر

جدول ۲. بار مرده پلهای اول تا پنجم مورد بررسی

	پل اول	پل دوم	پل سوم	پل چهارم	پل پنجم
DL(ton)	۱۳۱۸	۶۴۷	۱۴۹۶	۱۰۶۴	۱۹۳۰

۶- مقایسه مقادیر B در گام ۳ با ۵

۷- در صورت مغایرت مقدار B در دوگام بالا، تغییر فرض اولیه جابجایی حداکثر d و تکرار گامهای فوق برای همگرا شدن جواب.

۸- براساس مقدار d و وزن پل وسایر پارامترها، ابعاد اولیه جداگر شامل طول، عرض، ضخامت هر لایه لاستیکی، تعداد لایه ها و ضخامت کل الاستومر به گونه ای به دست می آیند که شرایط زیر ارضا شوند.

$$\gamma_c \leq 2.5 \quad (15)$$

$$\gamma_c + \gamma_{s,s} + \gamma_r \leq 5.0 \quad (16)$$

$$\gamma_c + \gamma_{s,eq} + 0.5\gamma_r \leq 5.5 \quad (17)$$

فولادی حداقل دو میلیمتر انتخاب شده است تا بتوان اطمینان حاصل کرد که جداگر تحت تنش قائم با هر معیار زوالی خوب عمل می کند.

۹- براساس طراحی اولیه جداگرها، با انجام تحلیلهای تاریخچه زمانی غیرخطی، مقدار d_1 که برابر تغییر مکان حداکثر جداگر در برابر زلزله است، جایگزین مقادیر اولیه فرض d شده و با تکرار گامهای فوق سختی موثر و نسبت میرایی ویسکوز معادل به دست می آید.

بهبتر است مقدار ضریب شکل S بین هشت تا دوازده انتخاب شود تا نسبت سختی قائم به سختی افقی جداگر حدود ۴۰۰ باشد که در آن σ تنش قائم وارد بر سطح جداگر و G مدول برشی جداگر است.

۱۰- در نهایت باید کنترل کرد که سختی الاستیک K_u از رابطه (۱۸) کمتر نشود:

$$K_s = GA / T_r \quad (18)$$

۱۱- همچنین سختی قائم جداگر از رابطه (۱۹) محاسبه می شود که به قدر کافی (از مرتبه ES^2 یا حدود ۴۰۰ برابر) از سختی افقی بیشتر است:

$$K_v = E_c A / T_r \quad (19)$$

که در آن E_c مدول فشاری لحظه ای الاستومر است و برای جداگرهای مستطیلی از رابطه (۲۰) محاسبه می شود:

$$E_c = 4GS^2 \quad (20)$$

الاستیک (سختی اولیه)، سختی پس از جاری شدن (سختی ثانویه) و نیروی تسلیم جداگرها اولین گام را تشکیل می دهد. رفتار تقریباً تمام جداسازهای الاستومری را می توان دوخطی در نظر گرفت. بنابراین سه کمیت یاد شده اساس رفتار جداگر را در بر می گیرند. روش طراحی جداسازهای لرزه ای به صورت گام به گام به شرح زیر است [Zahraiee, 2006].

۱- فرض اولیه برای سختی برشی (K_u)، سختی ثانویه (K_d)، نیروی تسلیم (F_y) و جابجایی بیشینه جداگر (d).

۲- برای هر جداگر، سختی موثر (K_{eff}) از رابطه (۱۰) محاسبه شده و سختی موثر کل سازه جداسازی شده (K_{eff}) که ترکیب سختی همه جداگرها و سختی زیرسازه (K_{sub}) است، طبق رابطه (۱۱) محاسبه می شود:

$$K'_{eff} = \frac{\left[F_y + K_d \left(d - \frac{F_y}{K_u} \right) \right]}{d} \quad (10)$$

$$K_{eff} = \sum \left(\frac{K_{sub} \times K'_{eff}}{K_{sub} + K'_{eff}} \right) \quad (11)$$

۳- محاسبه پریود موثر کل سازه جداسازی شده (T_{eff}) از رابطه (۱۲) و تعیین ضریب B از رابطه (۱۳) که W وزن پل، g شتاب ثقل، A ضریب شتاب و S_i ضریب ساختگاه برای طراحی جداسازی لرزه ای هستند.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff} \times g}} \quad (12)$$

$$d = \frac{250AS_i T_{eff}}{B} \quad (13)$$

۴- محاسبه میرایی ویسکوز معادل β از رابطه (۱۴) که در آن EDC سطح محصور در نمودار هیسترتیک جداگر و d_i جابجایی حداکثر جداگر i ام است.

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \times \frac{EDC}{\sum (K_{eff} * d_i^2)} \quad (14)$$

۵- با توجه به میرایی ویسکوز معادل، تعیین B از جدول (۴)

جدول ۴. محاسبه ضریب B

β	< ۲	۲	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
B	۰/۸	۱/۱	۱/۲	۲/۵	۳/۷	۴/۹	۵/۱۱

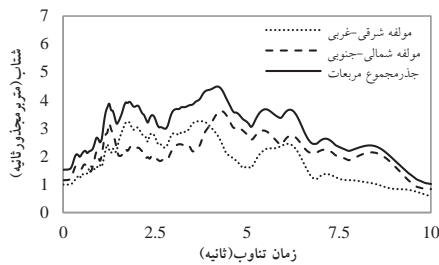
زوج شتابنگاشت زلزله های "طبس"، "منجیل" و "امپریال ولی" استفاده شده است که به روش فوق به مقیاس در آورده شده اند و در محاسبه تغییر مکان طرح جداسازها مورد استفاده قرار گرفته اند.

جدول ۵. مشخصات زوج شتابنگاشت های مورد استفاده

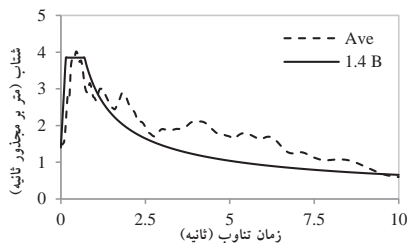
PGA مقیاس نشده		شتابنگاشت انتخابی
مولفه طولی	مولفه جانبی	
۰/۸۳۶	۰/۸۵۲	طبس
۰/۵۱۵	۰/۴۶۲	منجیل
۰/۷۷۵	۰/۵۸۸	امپریال ولی

مشخصات شتابنگاشتهای انتخابی در جدول (۵) ارایه شده است. سپس با استفاده از نرم افزار Seismosignal طیفهای مربوط به هر زوج شتابنگاشت برای نسبت میرائی ۵٪ رسم شده و با استفاده از روش جذر مجموع مربعات (SRSS) با یکدیگر ترکیب شده اند. در اشکال (۵) الی (۷) طیف های پاسخ ترکیبی و در شکل (۸) میانگین طیف های پاسخ ترکیبی و همچنین ۱/۴ برابر طیف طرح زلزله برای خاک تیپ III مطابق نشریه ۴۶۳ رسم شده است [Code of practice for design, 2008].

دو طیف فوق در محدوده زمان تناوب ۰.۲T و ۱.۵T برای تمام گزینه ها با یکدیگر مقایسه شده اند و ضریب مقیاس برابر ۱/۲۵۳ به دست آمده است.



شکل ۵. طیف های پاسخ و ترکیبی زلزله "منجیل" برای نسبت میرائی ۵٪

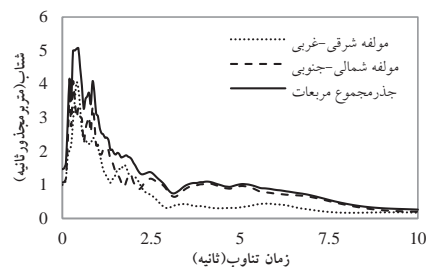


شکل ۶. مقایسه طیف پاسخ میانگین سه زوج شتابنگاشت با ۴/۱ برابر طیف طرح زلزله خاک تیپ III، نشریه ۴۶۳

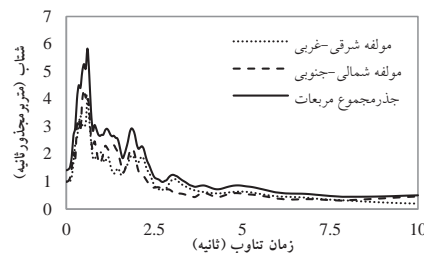
۶. تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی

برای مدل سازی و تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی پلهای جداسازی شده که به منظور طرح لرزه ای جداگرا و تعیین میزان تغییر مکان آنها تحت شتابنگاشت های انتخاب شده، از نرم افزار Nonlinear SAP2000 استفاده شده است.

الگوریتم بکار رفته در این برنامه برای حل معادلات حرکت، بسط روش FNA است که توسط ویلسون توسعه داده شده است. روش FNA یک روش بسیار موثر و کارآمد است که برای تحلیل سیستمهای سازه ای که در اصل دارای رفتار الاستیک خطی هستند ولی در آنها، تعداد محدودی المان غیرخطی که از پیش تعریف شده است، بکار می رود. با توجه به آنکه طبق توصیه آیین نامه ها فرض بر آن است [AASHTO, 2001]، که المانهای روسازه و زیرسازه در پلهای جداسازی شده در محدوده خطی باقی بمانند، بنابراین در تحلیلها، المانهای زیرسازه و روسازه با استفاده از المان Frame که دارای رفتار خطی هستند، مدل شده اند. تنها برای مدل سازی المان جداساز لرزه ای از المانهای غیرخطی NLink استفاده شده است. پس از مدل سازی، پلهای تحت تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی قرار گرفته و پارامترهای طرح جداسازها با توجه به نیرو و جابجائی حداکثر در آن ها محاسبه می شود. در این تحقیق از سه



شکل ۷. طیف های پاسخ و ترکیبی زلزله "طبس" برای نسبت میرائی ۵٪



شکل ۸. طیف های پاسخ و ترکیبی زلزله "طبس" برای نسبت میرائی ۵٪

۸. نحوه اتلاف انرژی هنگام زلزله

کارایی جداگرها به طور قابل ملاحظه ای تحت تأثیر سختی و میرایی آنهاست. میرایی جداساز، جابجائی را کنترل کرده و بخش عمده‌ای از انرژی ورودی زلزله را جذب و اتلاف می‌کند. اشکال ۱۱ و ۱۲ نمودارهای مقادیر انرژی ورودی و اتلاف آن در پل اول با جداساز لرزه ای تحت زلزله طبرس، به ترتیب در دو جهت طولی و عرضی را بر حسب $kN.m$ نسبت به زمان بر حسب ثانیه نشان می‌دهند. انرژی ورودی زلزله در پلهای جداسازی شده به صورت چهار انرژی، میرایی جداگرهای لرزه ای یا هیسترتیک سیستم جداساز، میرایی مودال، انرژی جنبشی و انرژی کرنشی جذب و اتلاف می‌شود.

با اعمال ضریب مقیاس فوق هر پنج پل تحت تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفته اند [Code of Practice for Design, 2008]. در جداول (۷) الی (۹) مشخصات هندسی جداگرها، پارامترهای مدل سازی طرح شده جداگرها و کنترل ضوابط آیین نامه اشتو در طرح آنها ارایه شده است.

۷. ضریب رفتار پلها با جداگر لرزه‌ای

در جداول (۱۲) و (۱۳) مقادیر ضریب رفتار و اجزای تشکیل دهنده آن به ترتیب در دو جهت طولی و عرضی که طبق روش "یانگ" محاسبه شده اند، آورده شده است. منحنی برش پایه- تغییر مکان پل پنجم با جداساز لرزه‌ای، در دو جهت طولی و عرضی نیز به ترتیب در اشکال ۹ و ۱۰ داده شده‌اند.

جدول ۷. مشخصات هندسی جداگرها

	L(cm)	B(cm)	h(cm)	t_f (mm)	T_r (cm)	t_s (mm)	n	S	G(kN/m ²)
پل اول	۳۵	۳۵	۱۳	۱۰	۱۱	۲	۱۱	۸/۷۵	۱۰۰۰
پل دوم	۳۵	۳۵	۱۶/۶	۱۲	۱۴/۴	۲	۱۲	۷/۲۹	۱۰۰۰
پل سوم	۳۰	۳۰	۷/۸	۸	۶/۴	۲	۸	۹/۳۷۵	۱۰۰۰
پل چهارم	۳۵	۳۰	۱۷/۸	۱۰	۱۵	۲	۱۵	۸/۰۸	۷۰۰
پل پنجم	۳۵	۳۵	۱۶/۶	۱۰	۱۴	۲	۱۴	۸/۷۵	۱۰۰۰

جدول ۸. پارامترهای طراحی جداگرها

	N	K_{eff} (kN/m)	T_{eff} (sec)	β %	K_u (kN/m)	F_y (kN)	K_d/k_u
پل اول	۲۴	۳۳۸۰۲	۱/۹۹۸	۱۵	۱۰۶۴۸	۱۲۲/۴	۰/۱
پل دوم	۲۴	۱۳۵۵۳	۲/۲۴	۵	۵۱۹۹	۳۱/۳	۰/۱
پل سوم	۶۰	۱۲۰۴۱۳	۱/۱۴۵	۱۵	۱۵۱۷۳	۶۱/۳	۰/۱
پل چهارم	۳۶	۲۰۰۹۰	۲/۵	۱۲	۴۵۰۰	۵۶/۶	۰/۱
پل پنجم	۷۲	۷۱۶۲۲	۱/۶۷	۱۲	۸۰۲۳	۵۳/۲	۰/۱

جدول ۹. کنترل ضوابط آیین نامه اشتو در طرح جداگرهای پلها

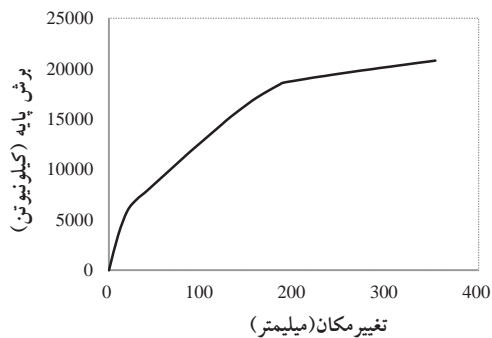
	γ_c	γ_r	γ_s	$\gamma_{s,eq}$	رابطه (۱۵)	رابطه (۱۶)	رابطه (۱۷)
پل اول	۰/۶	۲/۹۴۶	۰/۰۶۲۷	۲/۹۲۷	۰/۶	۳/۶۰۷	۵/۰
پل دوم	۰/۸۱۵	۰/۴۴۷	۲/۵	۴/۳۷۵	۰/۸۱۵	۳/۷۶۲	۵/۴۱۳
پل سوم	۰/۵۴۵	۰/۲۲۹	۰/۱۰۸	۱/۷۶۷	۰/۵۴۵	۰/۸۸۲	۲/۴۲۷
پل چهارم	۰/۷۱۷	۰/۴۳۶	۰/۰۲۷	۳/۱۵۶	۰/۷۱۷	۱/۱۷۹	۴/۰۹
پل پنجم	۰/۴۰۶	۰/۴۴۸	۰/۰۴۹	۱/۷۸۳	۰/۴۰۶	۰/۹۰۳	۲/۴۱۲

جدول ۱۳. پارامترهای ضریب رفتار پلهای جداسازی شده در جهت عرضی

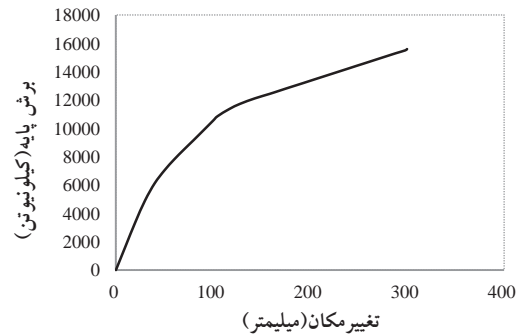
جهت Y	پل اول	پل دوم	پل سوم	پل چهارم	پل پنجم	میانگین
T(sec)	۱/۷۹	۲/۰۵	۱/۲۶۲	۲/۲۱	۱/۵۳۵	-
R _μ	۰/۹۷	۱/۱۴	۱/۱۹	۱/۵۳	۱/۱۷	۱/۲
Ω	۲/۶۴	۱/۸۵	۱/۱۹	۱/۹۶	۱/۷۷	۱/۸۸۲
R	۲/۵۷	۲/۱۱	۱/۴۲	۳	۲/۰۶	۲/۲۳۲

جدول ۱۲. پارامترهای ضریب رفتار پلهای جداسازی شده در جهت طولی

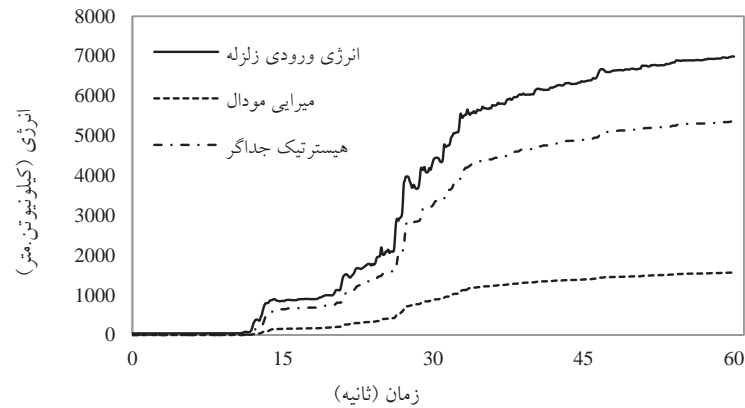
جهت X	پل اول	پل دوم	پل سوم	پل چهارم	پل پنجم	میانگین
T(sec)	۲	۲/۲۴	۱/۱۴۵	۲/۵	۱/۶۷	-
R _μ	۰/۹۳	۱/۰۴	۱/۰۷	۱/۳۵	۱/۴۸	۱/۱۷۴
Ω	۱/۲۸	۱/۳۴	۱/۵۴	۱/۴۴	۱/۴۳	۱/۴۰۶
R	۱/۱۸	۱/۴	۱/۶۴	۱/۹۴	۲/۱	۱/۶۵۲



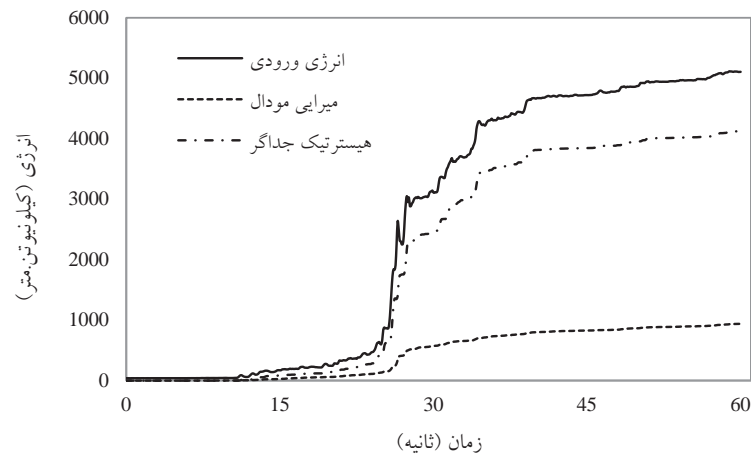
شکل ۱۰. منحنی برش پایه تغییر مکان پل پنجم با سیستم جداساز لرزه ای، جهت عرضی



شکل ۹. منحنی برش پایه-تغییر مکان پل پنجم با سیستم جداساز لرزه ای، جهت طولی



شکل ۱۱. انرژی ورودی و اتلاف آن در پل اول با جداساز لرزه ای تحت زلزله طیس، جهت طولی



شکل ۱۲. انرژی ورودی و اتلاف آن در پل اول با جداساز لرزه ای تحت زلزله طیس، جهت عرضی

است ضریب رفتار این گونه پلها نسبت به سایر مدلها کمتر باشد تا المانهای زیرسازه سختی بیشتر با جابجائی کمتری داشته باشند تا در محدوده خطی باقی بمانند.

۳- در بخش C6 از الحاقیه آیین نامه اشتو درمورد طرح پلهای جداسازی شده، مقدار ضریب رفتار را عددی در حدود ۱/۵ تا ۲/۰ و مقدار ضریب کاهش بر اثر شکل پذیری را نزدیک ۱/۰ معرفی کرده که انطباق خوب نتایج این تحقیق را نشان می‌دهد.

۴- پارامتر میرائی هیستریزس جداگرها در پلهای با جداگر LRB بیشترین تاثیر را در کاهش پاسخ لرزه ای وارده بر سازه دارند.

۵- هرچه رفتار جداگر به سمت حالت الاستوپلاستیک کامل برود، بازده آن بیشتر خواهد بود. مقادیر ضریب رفتار و ضریب کاهش بر اثر شکل پذیری در پلهایی با جداگر لرزه ای نشان می‌دهد، زیرسازه این گونه پلها شکل پذیری کمتری نسبت به حالت بدون جداگر دارند، که در عوض نیاز به تامین ضوابط ویژه شکل پذیری برای اتلاف انرژی در المانهای زیرسازه ندارند، زیرا شکل پذیری و اتلاف انرژی توسط سیستم جداساز لرزه ای تامین می‌شود.

۶- با توجه به آنکه سیستم جداسازی نوعی سیستم کنترلی برای سازه است، لازم است پارامترهایی نظیر زمان تناوب و میرائی کلی سیستم در طول زلزله ثابت باشد تا طراح بتواند رفتار سازه را در حین زلزله های مختلف به خوبی پیش بینی کند. برای دستیابی به این امر لازم است زیرسازه پل الاستیک بماند تا پارامترهای سختی و میرائی کلی سازه دستخوش تغییرات قرار نگیرد.

۱۰. مراجع

- آیین نامه بارگذاری پلها (۱۳۸۵)، نشریه شماره ۱۳۹، معاونت اموررفنی، دفتراموررفنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، چاپ سوم.

- آیین نامه طرح پلهای راه و راه آهن در برابر زلزله(۱۳۸۷)، نشریه شماره ۴۶۳، معاونت اموررفنی، دفتراموررفنی، تدوین معیارها و کاهش خطر پذیری ناشی از زلزله، چاپ اول، ۱۳۸۷.

باتوجه به نمودارهای فوق می توان نتیجه گرفت که پارامتر عمده جذب و اتلاف انرژی در پلهای جداسازی شده با جداگر LRB پارامتر هیستریتیک سیستم جداساز است و بیشترین تأثیر را در کاهش پاسخ لرزه ای وارده بر سازه دارد. هرچه سختی اولیه و نیروی تسلیم جداگر افزایش یابد، سطح داخل منحنیهای هیستریزس جداگر کوچک شده و در نتیجه از مقدار انرژی اتلاف شده توسط جداگرها کاسته می شود. به عبارت دیگر، هرچه سختی پس از جاری شدن جداگر افزایش یابد، سختی موثر کل پل افزایش یافته ولی دوره تناوب موثر پل و نسبت میرائی ویسکوز معادل جداگر کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج عددی ضریب رفتار می توان بیان کرد که پلهای جداسازی شده ضریب رفتار کمتری نسبت به پلهای معمولی دارند (حدود نصف) که این امر باعث می شود زیرسازه این گونه پلها عموماً الاستیک بماند. این گونه پلها بیشتر انرژی ورودی زلزله را از طریق میرائی هیستریتیک سیستم جداساز اتلاف می کنند.

۹. نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه آنها با مقادیر ارایه شده در آیین نامه اشتو می توان نتایج زیر را برشمرد:

۱- مقدار ضریب رفتار پلها در حالتی که از جداساز لرزه ای استفاده شده است، به طور میانگین در جهت طولی و عرضی به ترتیب برابر با ۱/۶۵۲ و ۲/۲۳۲ به دست آمده است. لازم به ذکر است این مقادیر در آیین نامه اشتو برای پلهای جداسازی شده، نصف حالت جداسازی نشده، یعنی به ترتیب برابر با ۱/۵۰ و ۲/۵۰ ارایه شده است که نشان می دهد ضرایب رفتار پیشنهادی آیین نامه مناسب است.

۲- علت کاهش ضرایب رفتار در حالت جداسازی شده با استفاده از جداساز LRB با رفتار غیرخطی، نسبت به حالت جداسازی نشده با نظیرن با رفتار خطی آن است که اصولاً به علت فلسفه استفاده از جداسازهای لرزه ای، المانهای روسازه و زیرسازه در پلهای جداسازی شده در محدوده خطی باقی بمانند. به این معنی که لازم

- Lee, G. C., Kitane, Y. and Buckle, I. G. (2001) "Literature review of the observed performance of seismically isolated bridges, mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/01.../06lee-bridges.pdf, pp 51-62
- Memari, A. M., Harris, H. G., Hamid, A. A. and Scanlon, A. (2005) "Ductility evaluation for typical existing RC bridge columns in the eastern USA", *Engineering Structures*, 27 (2) pp.203-212.
- Newmark, N. M. and Hall, W.J. (1982) "Earthquake spectra and design", *Earthquake Engrg. Res. Inst., El Cerrito, Calif.*
- Sarrazin, M., Moroni. O., Neira. C. and Venegas. B. (2012) "Performance of bridges with seismic isolation bearings during the Maule earthquake, Chile", *Soil dynamics & Earthquake Engineering*, In press.
- Uang, C. M. (1992) "Establishing R (or R_w) and Cd factors for building seismic provisions", *Journal of Structural Engineering*, ASCE 117(1) pp. 19-28.
- Zheng, Y., Usami, T. and Ge, H. (2003) "Seismic response predictions of multi-span steel bridges through pushover analysis", *Earthquake Engng & Struct. Dyn.*, 32 (8) pp 1259-1274.
- تسنیمی، عباسعلی و معصومی، علی (۱۳۸۵) "محاسبه ضریب رفتار قاب خمشی بتن مسلح"، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ اول..
- زهرائی، سید مهدی (۱۳۸۵) "آشنایی با جداسازهای لرزه ای و تاثیر آن بر عملکرد پلها"، تهران: پژوهشکده حمل و نقل، چاپ اول.
- زهرائی، سید مهدی و سامی، حبیب (۱۳۸۷) "ارزیابی عملکرد لرزه ای پلها با تکیه گاههای موجود انبساط حرارتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال ۵ شماره ۴، زمستان.
- زهرائی، سید مهدی و محمدی، محمد مهدی (۱۳۸۴) "افزایش ایمنی پلها در برابر زلزله به کمک جداسازی لرزه ای"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دوم، شماره ۴، زمستان، صص ۲۳۷-۲۳۳.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2001). "Guide specification for seismic isolation design", AASHTO.
- Fu, Chung C. and AlAyed, H. (2003) "Seismic analysis of bridges using displacement-based approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Constantinou, M. C. and Quarshie, J. K. (1998) "Response modification factors for seismically iso-lated bridges", MCEER-98-0014, 268 pages.
- Freeman, S. A. (1990) "On the correlation of code force to earthquake demands", *Proceeding of the 4th U.S-Japan Workshop on Improvement of Building Structural and Construction Practices (ATC15-3)*, August.
- Hambly, E. C. (1991) "Bridge deck behaviour", 2nd edition, Taylor & Francis, 313 pages.
- Jonsson, M. H., Bessason, B. and Hafliðason, E. (2010) "Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (6) pp.447-455.